

УДК 681.586.5

А.Н. Котов, А.Л. Гурашкин, А.А. Старостин, В.В. Шангин

Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТОРЦЕВОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обсуждаются принципы работы и особенности реализации разработанного оптоволоконного устройства для импульсной терморелефлектотометрии на базе внешнего интерферометра Фабри–Перо. Показана возможность изучения локальных тепловых процессов в приповерхностных слоях образцов по изменению термоотражения зондирующего излучения при импульсном лазерном нагреве. Сравнение экспериментальных данных с моделирующими расчетами показало преимущественное влияние механизма термодформаций в случае металлических образцов.

Ключевые слова: лазерный нагрев, поверхность, термооптический метод, волоконно-оптический датчик, термодформация, интерферометр Фабри–Перо.

A.N. Kotov, A.L. Gurashkin, A.A. Starostin, V.V. Shangin

The Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

APPLICATION OF END-FACE FIBER OPTIC SENSOR FOR THERMOOPTICAL RESEARCH

The principles of operation and implementation features of the developed fiber-optic device for pulsed thermoreflectometry based on an external Fabry-Perot interferometer are discussed. The possibility of studying local thermal processes in the near-surface layers of samples by changing the thermal reflection of probing radiation during pulsed laser heating is shown. Comparison of experimental data with modeling calculations showed the predominant influence of the thermal deformation mechanism in the case of metal samples.

Keywords: laser heating, surface, thermo-optical method, fiber-optic sensor, thermal deformation, Fabry–Perot interferometer.

Введение

Для решения задачи бесконтактного контроля приповерхностных слоев, покрытий в микроэлектронной технологии, изучения многокомпонентных структур и материалов может быть применен метод изучения локальных тепловых процессов, использующий сочетание принципов лазерной диагностики и метода оптической терморелефлек-

тометрии по методу «накачка–зондирование» («pump–probe»). Импульсное лазерное излучение (pump) возбуждает в образце температурную неоднородность, скорость релаксации которой несет информацию о теплофизических свойствах облучаемой области. Параметры температурной релаксации неоднородности определяются по синхронному с нагревающим импульсом изменению амплитуды отраженного излучения зондирующего (probe) лазера [1–8]. Изучение особенностей термоотражения при релаксации локальной температурной неоднородности в приповерхностном слое исследуемого материала позволяет определить закономерности изменения физических характеристик образца при действии различных внешних факторов, например, температуры и магнитного поля [2–4]. Зачастую такие исследования необходимо проводить на малых образцах в стесненных условиях малогабаритных измерительных ячеек в имеющихся установках без оптических окон, в связи с чем затруднено использование крупногабаритных оптических схем и оборудования. Другое применение термооптических измерений связано с возможностью контроля различных процессов лазерной термообработки поверхности изделий. Одно из достоинств лазерной обработки – это высокая пространственная разрешающая способность воздействия на материал. Она обеспечивает формирование структур или воздействие на функциональные элементы с микрометрическими размерами. Качество термообработки поверхности преимущественно зависит от строгости выполнения заданных режимов нагрева и охлаждения. Поэтому понятна необходимость разработки средств измерения быстропротекающих процессов при импульсной термообработке таких микроэлементов.

Для бесконтактных измерений быстроизменяющейся температуры широко используются оптические датчики на основе ряда термооптических эффектов [3]:

- тепловое излучение нагретого тела;
- температурная зависимость показателя преломления;
- температурное изменение коэффициента поглощения;
- температурное изменение коэффициента отражения в результате изменения преломления и поглощения, а также термодформации поверхности.

Для указанных эффектов термооптические коэффициенты имеют малые значения. Измерения возможны либо при больших перепадах

температуры, либо в особых случаях, например, на краю собственного оптического поглощения материала. Применение интерферометров позволяет увеличить чувствительность оптических схем для термооптических измерений. Однако с этой целью часто используются громоздкие схемы с крупногабаритной оптикой и сложной настройкой. Современное развитие оптических микротехнологий сделало возможным построение подобной системы для оценки локальных тепловых свойств образцов на базе оптоволоконных элементов [2]. Конфигурации низкокогерентной интерферометрии с волоконной оптикой позволяют миниатюризировать датчики и разместить их на некотором расстоянии от электроники [9,10]. В производственный процесс достаточно интегрировать только химически инертное, компактное и прочное оптическое волокно. Требуются относительно недорогие оптические компоненты, что делает эту технологию доступной. Целью данной работы является демонстрация возможностей сочетания низкокогерентной интерферометрии с волоконной оптикой для создания компактных датчиков контроля тепловых процессов при импульсной лазерной обработке.

Термооптический метод

Физические процессы, происходящие при лазерной импульсной обработке, отличаются большим разнообразием и зависят от плотности мощности лазерного излучения на поверхности. Импульсный лазерный нагрев сопровождается локальным тепловым расширением приповерхностного слоя основного материала, которое приводит к возникновению механических напряжений в нагреваемом слое [4–8]. Тепловое расширение происходит в тонком приповерхностном слое толщиной порядка $(a\tau)^{1/2}$, где a – температуропроводность материала поверхностного слоя, τ – длительность импульса излучения (для микросекундного импульса $(a\tau)^{1/2}$ составляет величину порядка единиц микрометров). В результате имеет место ускоренное смещение центра массы этого слоя. Радиальное тепловое расширение упругого слоя приводит к возникновению в нем термических напряжений сжатия и деформации поверхности. Максимальные значения температуры, напряжения и деформации достигаются в центре облучаемой площадки и должны контролироваться для выполнения заданных режимов термообработки.

Термооптические методы используют различные вторичные эффекты, возникающие при поглощении импульса излучения образцом [3, 4]. В случае термоотражения от «теплового зеркала» обеспечивается высокое пространственное разрешение [5, 6]. Метод заключается в обнаружении изменений отражения образца, вызванных нагревом. Наиболее значимые изменения происходят в результате термооптических и термоупругих эффектов. Чтобы определить слабые изменения в отраженном излучении, в экспериментальную установку включается интерферометр. Он служит для обнаружения изменения показателя преломления и смещения поверхности образца при изменении температуры. Изменение оптического пути при изменении температуры поверхности определяется из интерферометрического сигнала с использованием полуаналитических и числовых инструментов. В результате влияния как термооптического, так и термоупругого эффектов в общем случае сигнал может содержать оба вклада.

Временные и пространственные распределения температуры и деформаций при локальном нагреве рассмотрены в цикле работ [5–8]. Применим к нашему случаю модель С.В. Винценца с соавторами [7, 8] с гауссовым распределением мощности в нагревающем луче:

$$I(r, t) = \frac{E}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) f(t), \quad (1)$$

где $f(t)$ – нормированная временная зависимость формы импульса; E – энергия импульса; ω – радиус гауссова светового пучка на поверхности образца.

При поверхностном поглощении излучения размер нагретой области много больше глубины поглощения, и можно исходить из модели локального поверхностного теплового источника.

Изменение температуры в пятне нагрева $T(r, t)$ для теплоизолированной поверхности имеет вид изменяющегося со временем колокола с максимальной температурой в центре ($r = 0$). Для центра пятна нагрева имеем выражение для зависимости температуры от времени [7, 8]:

$$T(0, t) = \frac{2E_0}{c_p \rho_0} \int_0^t \frac{1}{(4\pi a \Delta t)^{1/2} \pi (\omega^2 + 4a \Delta t)} f(t') dt', \quad (2)$$

где E_0 – поглощенная энергия, $E_0 = E(1 - R)$; R – коэффициент отражения света; a – температуропроводность материала; c_p, ρ_0 – удельная теплоемкость и плотность материала соответственно; $\Delta t = t - t'$.

Сопутствующая термодиформация в центре по нормали к нагреваемой поверхности:

$$u_z(0, t) = u_0 \int_0^t \left(1 - \left(\frac{4\pi a \Delta t}{\omega^2 + 4a \Delta t} \right)^{\frac{1}{2}} \right) f(t') dt', \quad (3)$$

где u_0 – амплитуда квазиодномерного режима, $u_0 = (1 + \nu) \alpha_t \frac{E}{c_p \rho_0 \pi \omega^2}$;

α_t – коэффициент линейного теплового расширения; ν – коэффициент Пуассона.

Как показано в работах [7, 8], смещение поверхности за счет теплового расширения происходит замедленно относительно изменения температуры. На рис. 1 приведен пример относительных изменений во времени температуры $T(0, t)$ и деформации $u_z(0, t)$ в центре пятна нагрева в нормированном масштабе, длительность импульса нагрева 10 мкс, диаметр пятна нагрева 40 мкм, значение температуропроводности образца $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Запаздывание деформации относительно температуры зависит от размера пятна нагрева и значения температуропроводности образца. Если датчик будет воспринимать отражение только вблизи центра пятна нагрева, то сравнение регистрируемого сигнала с теоретическими зависимостями $T(0, t)$ и $u_z(0, t)$ даст информацию о соотношении термооптического и термоупругого эффектов для исследуемого образца.

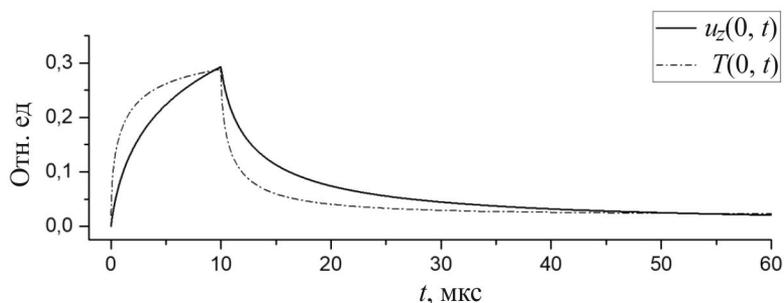


Рис. 1. Нормированные по амплитуде зависимости изменения температуры $T(0, t)$ и термодиформации $u_z(0, t)$ в центре пятна нагрева

Описание конструкции датчика

Современные одномодовые световоды с диаметром сердцевины около 10 мкм позволяют передать излучение на поверхность образца с соответствующей локальностью. Вблизи торца световода на расстоянии в несколько десятков микрометров существует область слабо расходящегося излучения достаточно высокой интенсивности для быстрого нагрева поверхности образца. Оценки показали возможность применения источников нагревающего излучения с мощностью десятки-сотни милливатт. Особенность оптической схемы на рис. 2 заключается в различии размеров нагревающего и обратно отраженного зондирующего лучей. Зондирующий луч «считывает» информацию с центрального участка пятна нагрева за счет ограничения расходящихся отраженных лучей на входной апертуре торцевого волоконного датчика. В схеме нагрева и контроля поверхности расходящимися лучами с выхода световода через зазор L диаметр поля моды световода составляет $2\omega_0$, диаметр площадки нагрева 2ω ; амплитуда термодформаций u_z связана с расширением материала образца от нагрева и может быть измерена интерферометром. Участок зондирования в центре пятна нагрева образуется за счет ограничения отраженных зондирующих лучей на входной апертуре торцевого волоконного датчика.

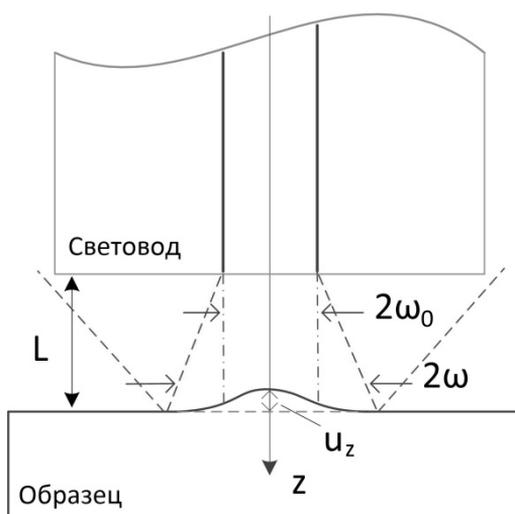


Рис. 2. Схема нагрева и контроля поверхности расходящимися лучами с выхода световода через зазор L

В имеющемся зазоре между торцом излучающего волокна и поверхностью образца создаются условия для работы интерферометра Фабри–Перо (ИФП) [9, 10], которые необходимо учитывать при реализации схемы. В представленном термооптическом устройстве реализовано совмещение импульсно нагревающего (pump) и считывающего (probe) лазерных лучей в одномодовом световоде с выходом на поверхность образца вблизи торца световода. Отличительной особенностью примененного торцевого оптоволоконного датчика с ИФП является его чувствительность к изменению локально отраженного оптического сигнала только от ограниченного центрального участка пятна нагрева (см. рис. 2). Волоконно-оптические датчики с ИФП наиболее распространены благодаря своей универсальности, простоте, быстрдействию, точности и невосприимчивости к шуму окружающей среды [9, 10].

Распространение излучения за волокном происходит в рамках модели гауссова пучка с перетяжкой на торце волокна. Ширину гауссова пучка характеризуют радиусом ω , который увеличивается (расходится) вдоль оси пучка, и в своем минимуме на торце световода соответствует радиусу перетяжки ω_0 . В рассматриваемом случае ω_0 задается половиной диаметра модового пятна световода. Подход на основе модели гауссова пучка предполагает, что пучок проходит удвоенную длину зазора ИФП – в прямом и обратном направлении, оставаясь гауссовым, и на границе с волокном имеет радиус, превышающий ω_0 . Расстояние, на котором пучок расширяется в два раза, определяет рэлеевскую длину пучка L_0 . Относительная доля η мощности отраженного от образца зондирующего излучения, которая будет «захвачена» волокном в виде излучения основной моды, будет определяться интегралом перекрытия поля моды и падающего на торец излучения [10]:

$$\eta = 1/(1+(L/L_0)^2). \quad (4)$$

Для стандартного одномодового световода SMF-28 диаметр поля моды $2\omega_0$ составляет около 10 мкм. При типичной числовой апертуре одномодового световода $N_A \approx 0,12$ $L_0 \approx 42$ мкм. Для величины зазора $L \approx 100$ мкм имеем: $2\omega \approx 34$ мкм, $\eta \approx 0,15$. В то же время информационная площадка ИФП на обрабатываемой поверхности соответствует полю основной моды световода ($2\omega_0 \approx 10$ мкм). Из формулы (1) следует, что в этом случае мощность нагрева на информационной площадке меняется менее чем на 8 %. Следова-

тельно, можно выбрать такое значение зазора L , при котором интенсивность нагрева будет достаточна для обработки, а показания интерферометра при допустимом ослаблении η будут соответствовать квазиизотермической площадке в центре пятна нагрева.

Описание экспериментальной установки

В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазерные диоды с оптоволоконным выходом. Лазерный диод мощностью 0,1–0,2 Вт с импульсной накачкой работает на длине волны 1470 нм и обеспечивает импульсный нагрев образца. Источник зондирующего излучения на основе DFB лазерного диода работает на длине волны 1530 нм с непрерывной мощностью 0,001 Вт. Применение DFB лазерного диода обусловлено требованием постоянства длины волны зондирующего излучения для стабилизации рабочей точки интерферометра на цикл измерения. Схема установки показана на рис. 3. Для объединения и разделения нагревающего и зондирующего лучей использовался спектральный сумматор-делитель. Выделение отраженного зондирующего излучения осуществлялось оптоволоконным циркулятором. Функцию синхронного усилителя сигнала фотоприемника выполнял цифровой осциллограф с внешней синхронизацией от импульса источника накачки нагревающего лазера. Предварительная настройка рабочей точки интерферометра на линейном участке рабочей характеристики достигалась регулировкой зазора с помощью пьезоэлектрического привода [2]. При установке рабочей точки на середине линейного участка интерферометра была достигнута чувствительность к смещениям поверхности около 10 мВ/нм при интенсивности шума около 1 мВ. Средняя величина регистрируемых сигналов составляла 10–30 мВ при протяженности линейного участка характеристики около 2–3 В. Различие в размерах области нагрева и участка отражения зондирующего излучения ИФП позволило производить измерения в квазиизотермических условиях. Вариация длительности греющего импульса позволила при прочих равных условиях изменять глубину прогрева приповерхностного слоя, т.е. изменять локализацию температурного возмущения на поверхности образца. Соответственно, можно изучать изменения скорости температурной релаксации и интенсивности приповерхностных теплообменных процессов.



Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились на малоразмерных образцах металлов и полупроводников с площадью поверхности от единиц до десятков квадратных миллиметров. Размер нагреваемого пятна на поверхности образца составлял до 50 мкм. При этом размер площадки измерения ИФП в центре пятна нагрева соответствовал размеру моды одномодового световода около 10 мкм. Согласно оценкам [7], при нагреве гауссовым пучком на площадке в три раза больше площадки измерения средние значения температуры и деформации отличаются от действительных менее чем на 10 %, что позволяет приближенно моделировать наблюдаемые процессы зависимостями $T(0,t)$ и $u_z(0,t)$ [7, 8] (см. рис. 1).

Конструкция измерительной ячейки с пьезоэлектрическим приводом позволила проводить эксперименты в широкой области температур [2]. После установки средней температуры образца производилась настройка рабочей точки интерферометра. Затем подавалась серия импульсов нагрева с одновременным контролем сигнала интерферометра. Наблюдаемый на осциллографе сигнал содержал участок нагрева и охлаждения. Амплитуда и скорость переходных процессов зависели от длительности нагревающего импульса, свойств образца и размера пятна нагрева.

Формирование сигнала интерферометра возможно при деформации нагреваемой поверхности и при изменении ее оптических характеристик с температурой. В обоих случаях происходит изменение сигнала в интерферометре. Наблюдаемые сигналы имеют амплитуду

на уровне 1 % от величины линейного участка характеристики интерферометра, что позволяет предположить аддитивное влияние обоих факторов. Данные экспериментов показывают взаимосвязь между формой регистрируемых сигналов и теплофизическими свойствами нагреваемого микроучастка на поверхности образца. В используемой модели основное влияние на форму сигнала оказывают температуропроводность образца и размер нагреваемого участка. Сопоставляя экспериментальные данные с модельными, можно оценить влияние каждого фактора на формирование результирующего сигнала. На рис. 4 приведены соответствующие зависимости, демонстрирующие преобладание механизма термодформаций в случае металлических образцов.

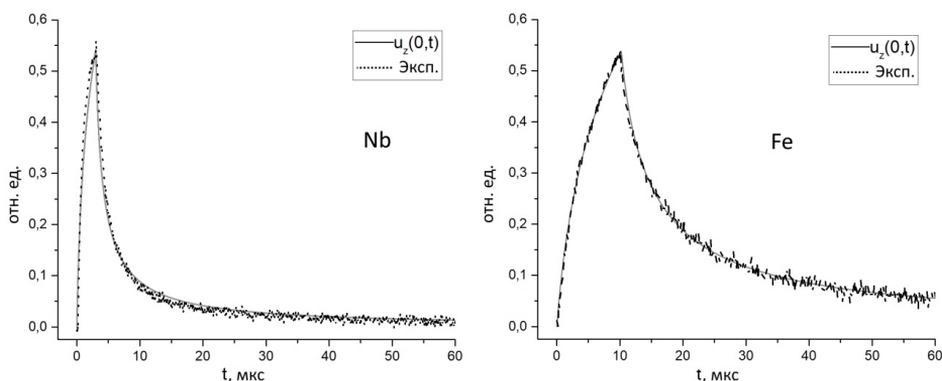


Рис. 4. Нормированные по амплитуде экспериментальные временные зависимости термооптического сигнала в сравнении с моделирующими зависимостями термодформации от времени $u_z(0,t)$ для металлических образцов

Заключение

В ходе исследования выявлена возможность импульсной термообработки и оценки интенсивности сопутствующих тепловых процессов на микроучастках поверхности образцов с помощью торцевого оптоволоконного датчика. Устройство реализовано в компактной оптоволоконной схеме с одновременной подачей нагревающего и зондирующего излучений по одному одномодовому световоду. Опробована структура оптоволоконной оптики в схеме «накачка–зондирование» с внешним интерферометром Фабри–Перо для быстрого термооптического контроля тепловых процессов при

импульсном лазерном нагреве. Регулировка зазора ИФП позволила изменять размер площадки нагрева до 50 мкм при постоянном размере площадки измерений около 10 мкм в центре пятна нагрева. Проведены опыты на металлических и полупроводниковых образцах. Сравнение экспериментальных данных с моделирующими расчетами показало соответствие регистрируемого сигнала временным зависимостям термодформаций в случае металлических образцов. В случае полупроводников обнаружено более сложное сочетание термооптических эффектов. Дальнейшее развитие работы предполагается в направлении характеристики приповерхностных свойств образцов на микроучастках по скорости релаксации импульсного теплового возмущения.

Список литературы

1. Taketoshi N., Baba T., Ono A. Thermal diffusivity measurement of a thin metal film with a picosecond thermoreflectance technique // *High Temp.-High Press.* – 2002. – Vol. 34, № 1. – P. 19–28.
2. Laser pump-probe fiber-optic technique for characterization of near-surface layers of solids: development and application prospects for studying semiconductors and weyl semimetals / A.A. Starostin [et al.] // *Annalen der physik.* – 2020. – Vol. 532, № 8. – P. 1900586.
3. Magunov A.N. Laser thermometry of solids: state of the art and problems // *Measurement Techniques.* – 2002. – Vol. 45, № 2. – P. 173–181.
4. Photothermal and optoacoustic spectroscopy: state of the art and prospects / M.A. Proskurnin [et al.] // *Phys.-Usp.* – 2022. – Vol. 65, № 3. – P. 270–312.
5. Pulsed photothermal mirror technique: characterization of opaque materials / O.A. Capeloto [et al.] // *Appl. Opt.* – 2014. – Vol. 53, № 33. – P. 7985.
6. Marcano A., Gwanmesia G., Workie B. Photothermal mirror method for the study of thermal diffusivity and thermo-elastic properties of opaque solid materials // *Int. J. Thermophys.* – 2017. – Vol. 38, № 9. – P. 136.
7. Instantaneous profiles of quasistatic deformations and displacements of solid surfaces during local laser irradiation / S.V. Buntsents [et al.] // *Physics of the Solid State.* – 1996. – Vol. 38, № 4. – P. 552–557.
8. Vintsents S.V., Dmitriev S.G., Spiridonov K.I. Quasi-one-dimensional thermal deformation and displacement of the surface of a solid

in a pulsed laser beam // *Phys. Solid State.* – 1997. – Vol. 39, № 12. – P. 1985–1988.

9. Fiber-optic Fabry–Perot acceleration and vibration sensor made by MEMS technology / M.S. Kotliachkov, A.M. Minkin, L.A. Zhikina, A.A. Ogleznev // *Applied photonics.* – 2023. – Vol. 10, № 2. – P. 56–67.

10. Liokumovich L., Markvart A., Ushakov N. Utilization of extrinsic Fabry–Perot interferometers with spectral interferometric interrogation for microdisplacement measurement // *Journal of Electronic Science and Technology.* – 2020. – Vol. 18, № 1. – P. 100030.

References

1. Taketoshi N., Baba T., Ono A. Thermal diffusivity measurement of a thin metal film with a picosecond thermoreflectance technique. *High Temperatures – High Pressures*, 2002, vol. 34, no. 1, pp. 19-28.

2. Starostin A.A., Shangin V.V., Lonchakov A.T., Kotov A.N., Bobin S.B. Laser pump-probe fiber-optic technique for characterization of near surface layers of solids: development and application prospects for studying semiconductors and Weyl semimetals. *Annalen der Physik*, 2020, vol. 532, no. 8, pp. 1900586-1900593.

3. Magunov A.N. Laser thermometry of solids: state of the art and problems. *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 173-181.

4. Proskurnin M.A., Khabibullin V.R., Usoltseva L.O. et al. Photo-thermal and optoacoustic spectroscopy: state of the art and prospects. *Physics-Uspokhi*, 2022, vol. 65, no. 3, pp. 270-312.

5. Capeloto O.A., Lukasiewicz G.V.B., Zanuto V.S. et al. Pulsed photothermal mirror technique: characterization of opaque materials. *Appl. Opt.*, 2014, vol. 53, no. 33, pp. 7985-7991.

6. Marcano A., Gwanmesia G., Workie B. Photothermal mirror method for the study of thermal diffusivity and thermo-elastic properties of opaque solid materials. *Int. J. Thermophys.*, 2017, vol. 38, no. 9, p. 136.

7. Buntsents S.V., Dmitriev S.G., Shagimuratov O.G. Instantaneous profiles of quasistatic deformations and displacements of solid surfaces during local laser irradiation. *Physics of the Solid State*, 1996, vol. 38, no. 4, pp. 552-557.

8. Vintsents S.V., Dmitriev S.G., Spiridonov K.I. Quasi-one-dimensional thermal deformation and displacement of the surface of a solid

in a pulsed laser beam. *Physics of the Solid State*, 1997, vol. 39, no. 12, pp. 1985-1988.

9. Kotliachkov M.S., Minkin A.M., Zhikina L.A., Ogleznev A.A. Fiber-optic Fabry–Perot acceleration and vibration sensor made by MEMS technology. *Applied Photonics*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 56-67.

10. Liokumovich L., Markvart A., Ushakov N. Utilization of extrinsic Fabry-Perot interferometers with spectral interferometric interrogation for microdisplacement measurement. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2020, vol. 18, no. 1, p. 100030.

Сведения об авторе

КОТОВ А.Н.

e-mail: artem625@mail.ru

Младший научный сотрудник Лаборатории высокотемпературных измерений Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

ГУРАШКИН А.Л.

e-mail: nano-studio@yandex.ru

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории высокотемпературных измерений Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

СТАРОСТИН А.А.

e-mail: astar2006@mail.ru

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории высокотемпературных измерений Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

About the author

KOTOV A.N.

e-mail: artem625@mail.ru

Junior Research Fellow, Laboratory of High Temperature Measurements, Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

GURASHKIN A.L.

e-mail: nano-studio@yandex.ru

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, Laboratory of High Temperature Measurements, Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

STAROSTIN A.A.

e-mail: astar2006@mail.ru

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory of High Temperature Measurements, Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

ШАНГИН В.В.

e-mail: *nano-studio@yandex.ru*

Кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории высокотемпературных измерений Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

SHANGIN V.V.

e-mail: *nano-studio@yandex.ru*

Ph.D. in Technical Sciences, Research Fellow, Laboratory of High Temperature Measurements, Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00789, <https://rscf.ru/project/22-29-00789/>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 10.09.2023

Одобрена: 18.09.2023

Принята к публикации: 20.09.2023

Financing. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-00789, <https://rscf.ru/project/22-29-00789/>.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Authors Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 10/09/2023

Approved: 18/09/2023

Accepted for publication: 20/09/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Применение торцевого оптоволоконного датчика для термооптических исследований / А.Н. Котов, А.Л. Гурашкин, А.А. Старостин, В.В. Шангин // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 98–111.

Please cite this article in English as: Kotov A.N., Gurashkin A.L., Starostin A.A., Shangin V.V. Application of end-face fiber optic sensor for thermo-optical research // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 98-111.